干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.08

甘肃一次副高内部极端强降水可预报性思考①

狄潇泓[1]， 王小勇[2]， 肖 玮[1]

（1 兰州中心气象台，甘肃 兰州 730020； 2 甘肃省公共气象服务中心，甘肃 兰州 730020）

摘 要：传统认为副高内部下沉运动，抑制对流运动的发生，但是甘肃河东隔几年就会出现一次副高内部的强降水过程，而全球业务模式对此类强降水预报能力较弱，导致副高内部的强降水天气预报难度很大。利用多种常规和非常规观测资料，对2016年8月22日甘肃副高内部的一次极端强降水过程进行分析，以期发现一些可用预报指标，结果表明：青藏高压东北部辐散区和近地面层的中尺度辐合线的叠置，有利于形成强烈的上升运动，是强降水发生的天气背景条件。环境场极高的水汽含量，异常厚的暖云层，和小的垂直风切变有利于形成极大的降水效率，是强降水的增强条件。通过对各种中尺度观测资料的分析，发现一些对强降水预报预警有指示作用的因子：(1) 对流云团冷云盖中心区域运动前方逐时云顶亮温(*TBB*)梯度最大处对应地面降水最强降水。(2) 闪电总次数峰值后1～2 h，且闪电带变的很有组织时，对应地面最强降水时段。(3) 造成强降水的对流单体的雷达回波表现出低质心暖云降水的特征。(4) 在组合反射率(*CR*)、垂直液态水含量(*VIL*)最大值出现后30～40 min，最强雨强出现。

关 键 词： **极端强降水；副高；可预报性；降水效率**

西太平洋副热带高压(以下简称副高)是影响我国暴雨的大尺度环流系统之一[1]，暴雨一般出现在其西北侧。甘肃的短时强降水和暴雨也不例外，一般发生在副高西北侧或北侧的高温、高湿、高能区中，长期以来，预报员对副高边缘的暴雨发生的规律总结较多，也形成了成熟的概念模型[2-3]，副高西北侧西南气流的强度和位置决定甘肃暴雨的强度和落区。通常认为，副高内部为下沉运动，会抑制对流运动的发生、发展，一般为晴到少云区。实际工作中，用500 hPa图上588 dagpm线表征副高，在早期客观预报方法中，高度>588 dagpm会被作为降水的消空指标。但是，每隔1～2 a，甘肃河东总会出现一次副高内部，588甚至592 dagpm线包围区内的短时强降水或暴雨过程，这种天气具有来势凶猛、降水强度很大、破坏力很强的特点，预报难度极大，几乎无一例外的会出现预报失误，更容易造成较大的灾害损失和影响。应该对此类强对流进行深入分析研究，找到可预报的技术指标。

吴国雄等[4]通过长期观测和数值模拟研究发现：副高的垂直结构非常复杂，夏季西太副高在北太平洋区域165°E以西受上升运动控制，因此在500 hPa上对应着大范围的上升运动，而不是下沉运动。傅云飞等[5]发现副高中心区域四季均存在降水。中东部各省对副高内部的强降水有不同程度的分析研究：曹美兰等[6]对浙江副高内部的强降水分析后，得出副高内部水汽、对流不稳定条件都很强，当有适当的触发机制时，即发生大规模强对流天气；尹红萍等[7]对上海副高内的强对流进行统计分析，发现边界层内的中尺度辐合线是此类天气产生的重要原因之一；支树林等[8]对江西副高控制下的一次大暴雨中尺度特征分析后发现，地面冷空气加强了降水，雷达径向速度图上的中尺度涡旋是暴雨发生的重要因素。目前，西北地区的学者对西北暴雨、强降水做了许多研究，取得很多成果。赵庆云等[9]通过数值模拟，得出甘肃暴雨特征，李如琦等[10]、许东蓓等[11]从等熵位涡理论、螺旋度等暴雨产生的热、动力条件方面对西北暴雨产生机理进行了研究，程瑛等[12]从灾害

① **收稿日期**：2019-03-12； **修订日期**：2019-07-27
基金项目：公益性行业专项(GYHY201506006)
作者简介：狄潇泓(1975-)，女，高工，本科，研究方向为天气预报. E-mail:xhdi@sohu.com

发生的角度对甘肃致灾强降水进行了分析，付双喜等[13]通过统计计算了甘肃短时强降水发生的环境参数。但针对发生在甘肃河东青藏高原东北边缘的副高内部的暴雨、强降水天气研究较少。

本文通过对2016年8月22日甘肃副高控制下的强降水过程进行分析，主要讨论雨带南部碌曲的极端强降水，探究其强降水发生的成因，雷达回波与雨量的定量关系，以及复杂地形的影响，为此类强天气的预报提供一些参考。

1　降水概况

2016年8月22日8时～23日8时，甘肃省甘南州北部、陇中北部出现暴雨甚至大暴雨，强雨带呈东北—西南走向的带状分布（图1a），自东北到西南，有数个暴雨中心，共有21个站日雨量超过50 mm，甘南州碌曲县日雨量123.5 mm，为这次过程大暴雨中心。1 h降水量≥20 mm的短时强降水共61站次，其中有3站1 h降水量≥50 mm，最大雨强出现在碌曲，21:00～22:00达71.6 mm·h^{-1}。图1b为碌曲站20:00～23:00逐10 min雨量，可以看到，降水集中在20:20～22:20两个小时之内，21:10～21:20，10 min雨量达到23.4 mm。

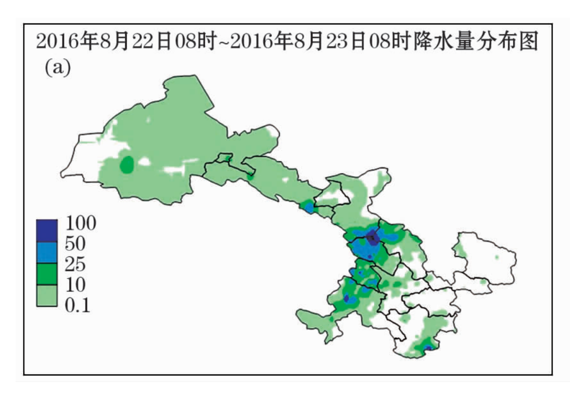
碌曲位于甘肃省西南部甘南藏族自治州，青藏高原东边缘，甘、青、川三省交界处，地势西高东低，地形复杂，气象站海拔3 106.7 m。碌曲站22日降水量超该站建站以来历史极值（2006年8月31日84.4 mm）的1.5倍，历史第二（1976年8月2日59 mm）的2倍多。自碌曲1973年建站以来到2015年，仅出现暴雨3次，可见这次强降水是一次极端降水过程，降水时间集中，雨强极大，强降水范围小。造成碌曲县城水利设施损毁严重，与之临近的夏河县出现洪水泥石流，经济损失巨大。

2　全球模式预报情况

对T639、EC细网格、Grapes、日本等4个全球模式及EC、NCEP集合预报21日08时、21日20时、22日08时起报的对22日08时～23日08时24 h累积雨量预报回查，各家数值模式均对强降水出现不同程度的漏报，T639对强雨带北端有反应，但量级偏小一半，日本模式对强雨带南端有反应，量级也偏小一半以上，EC确定预报在强雨带处报了2.5 mm以下降水，Grapes以无雨为主。EC及NCEP集合预报对强降水带北端≥25 mm的概率仅有5%，南端为0%，均没有预报出暴雨区的强降水。由以往预报业务中的经验，全球模式降水预报对高原地区的降水精度较平原地区低，而且全球业务模式由于分辨率较低，对形成此类强降水的中尺度系统模拟能力有限，预报效果不够理想，也说明副高内部强降水是副高内部发展起来的中尺度天气系统造成，预报难度很大。

3　环流背景

8月22日20时，100 hPa等压面上（图2a），青海上空为青藏高压控制，高压东北侧为辐散区，碌曲处于中心值为$+12\times10^{-5}\cdot s^{-1}$强辐散中心东端；500 hPa上（图2b），我国40°N以南大部为反气旋控制，碌曲处于592 dagpm闭合等压线控制区内，但散度场上是$-6\times10^{-5}\cdot s^{-1}$的辐合区；700 hPa上（图2c）青海东部到甘南为辐合区，碌曲处于辐合0线



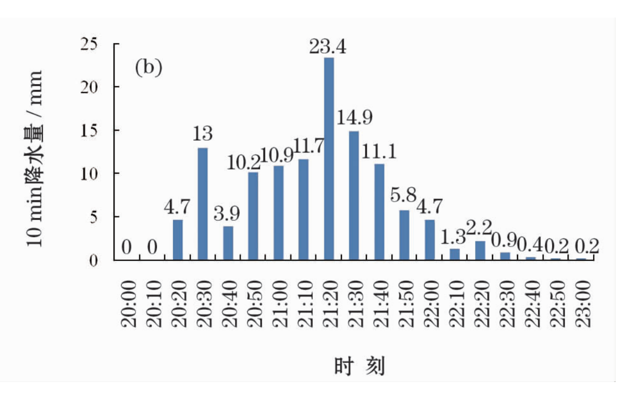


图1　2016年8月22日08:00～23日08:00甘肃省累积雨量（a）和碌曲站逐10 min雨量（b）

Fig. 1　Accumulated rainfall of Gansu Province from 09:00, 22 to 08:00, 23 August, 2016 (a) and per 10 min rainfall of Luqu station (b)

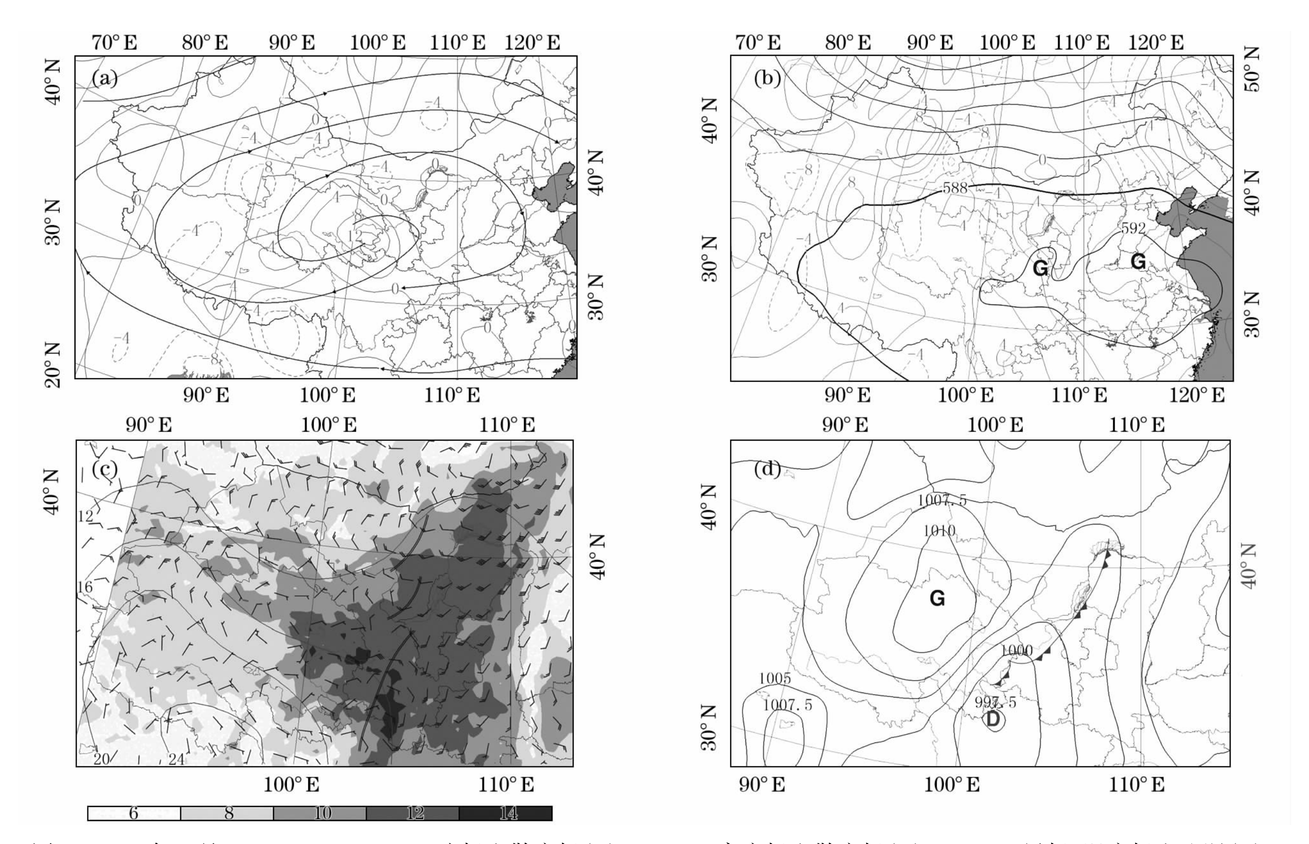


图 2　2016 年 8 月 22 日 20:00 100 hPa 流场和散度场(a)、500 hPa 高度场和散度场(b)、700 hPa 风场、温度场和比湿(c)、地面气压场(d)

Fig. 2　100 hPa flow field and divergence (a), 500 hPa height field and divergence (b), 700 hPa wind field and divergence (c), surface pressure field (d), at 20:00 on August 22, 2016

附近,有暖式切变线与辐合区配合。

地面图上,22 日 08 时,河西西部到青海西北部有强度 1 010 hPa 的高压东移,高压前部,青海东南部到甘南有低压发展,中心强度 1 000 hPa,之后到 17 时,高压强度维持,并略向东移,低压位置稳定,强度加强到 995 hPa,低压倒槽从甘南向东北方向伸展,暴雨区处于高压前部等压线密集区到低压倒槽之间,碌曲处于地面热低压东北部,低压倒槽对应的流场上为西北风与东南风的汇合带,碌曲正是在这个汇合带上。20～23 时(图 2d)地面形势维持,低压中心因日变化强度略减。另外,对于甘南附近的地面的风场,模式的分析场和实况场有较大差别,碌曲及其上游的 4 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ 的偏西风均在分析场上均为 2 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ 的偏东风,这可能是模式对此次过程地面冷空气影响分析不足的原因之一。

这种天气尺度高空辐散,低空辐合,地面有冷空气渗透的形势场配置,有利于抽吸作用的产生,促进深厚对流的发生、发展。

4　中尺度环境场配置及降水极端性分析

4.1　中尺度环境场配置

由 2016 年 8 月 22 日 20:00 高低空环流配置图(图 3a)可见,200 hPa 上碌曲处于南亚高压中心略偏东处,500 hPa 上在高压中心 592 dagpm 线北侧,35°N 以北,河西东部到中部偏北地方,500 hPa、700 hPa 切变线,以及地面辐合线呈前倾结构排列。700 hPa 上,河东比湿在 12 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$ 以上,合作站比湿更是达到 16 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$,这在甘南是罕见的。从 20 时合作站的探空图(图 3b)上可以看到温度曲线为条件不稳定,550 hPa 附近有冷空气侵入,使得温度曲线在 550 hPa 附近,有一小段绝对不稳定,并且增大了 550 hPa 到地面的对流不稳定性。对流有效位能(*CAPE*)为 920 $\mathrm{J \cdot kg^{-1}}$,沙氏指数(*Si*)达到 −3.16 ℃,最大上升速度达 42.9 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$。表明甘南上空大气层结极不稳定。

4.2　降水极端性分析

对于强降水预报,首先根据物理机制理解可以确定两个要素:降水率(*R*)和降水持续时间(*D*),即

图3　2016年8月22日20时天气系统配置(a),合作站 $T-\ln p$ 图(b)

Fig. 3　Weather system configuration(a) and $T-\ln p$ image in Hezuo(b) on August 22,2016

最强的降水率和最长的持续时间导致最大的降水。降水率 $R=E\times\omega q$,其中 E 为降水效率,ω 为垂直运动,q 为比湿,即高降水效率、强上升运动和高比湿能够产生大雨强[14]。具体的降水效率要对每一个对流单体进行计算,但对于由较多对流单体组成的对流系统,每个对流单体的降水效率可能千差万别且不易计算,因此,在预报上需要从整个对流系统进行定性考虑[15]。根据云物理理论,一般情况下环境整层相对湿度越大、云底到0 ℃层的厚度越大,即暖云层厚度越厚、垂直风切变越小,越有利于高降水效率。

为分析此次碌曲大暴雨的极端性,选取碌曲站本世纪另外两次极端降水过程前的相关物理量,对环境湿度、暖云层厚度、垂直风切变进行对比分析。两次过程分别是2006年8月30日,日降水84.9 mm,现历史排名第二;2014年8月5日,日降水48.3 mm,现历史排名第五。

由表1可见,和其它两次过程相比,22日碌曲地面露点最大值和比湿较大,但并不是最大,异常的情况是700 hPa上合作比湿达到16 g·kg^{-1},这一高值是笔者做预报员多年很少在甘南甚至甘肃见到的。相对于碌曲的海拔高度,700 hPa大约是边界层下层。22日甘南上空0 ℃层高度异常偏高,在500 hPa以上,达到6 070 m,这也是在甘南高原少见的,同时,抬升凝结高度(LCL)较低,只有695.9 m,说明这天暖云层厚度很厚。另外,这次过程具有很小的0~6 km垂直风切变,只有0.21 m·s^{-1},而且对流层中上层垂直风切变也较小,这使得对流单体不会发展到较高的高度,不会形成云砧并将水滴从高层扩散出去[16]。综合分析,22日碌曲附近大气具有很高的环境相对湿度,且湿层较厚,暖云层很厚,垂直风切变较小,以上这些有利于高的降水效率。在预报预警中特别要警惕类似的近地面层高湿的区域。

表1　碌曲站3次极端降水过程前部分环境物理量

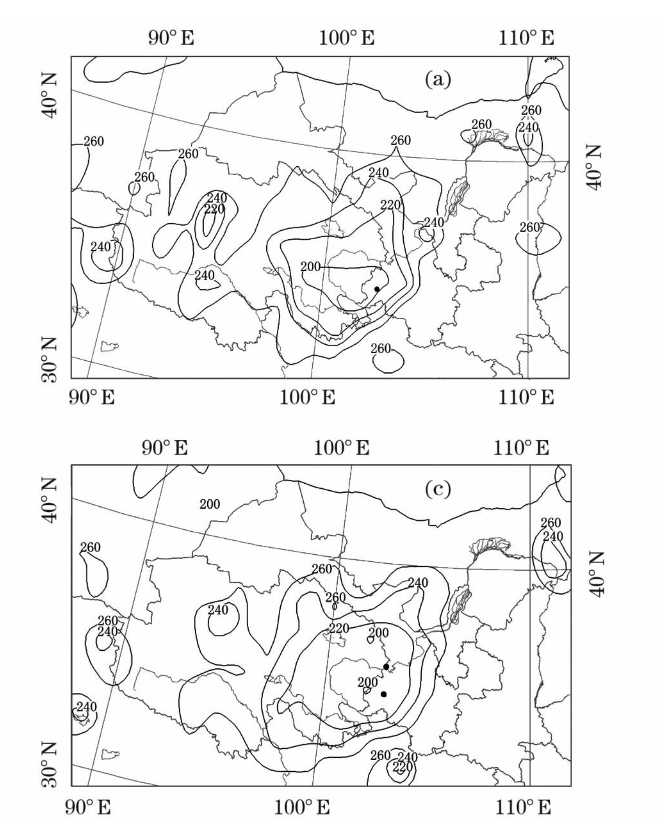
Tab. 1　Physical quantity of extreme precipitation in Luqu station

过程日期	环境湿度			暖云层厚度		0~6 km垂直风切变/m·s^{-1}
	最大地面露点/℃	最大地面比湿/g·kg^{-1}	700 hPa比湿/g·kg^{-1}	0 ℃高度/m	LCL高度/m	
2016-08-22	13	7.2	16	6 070.0	695.9	0.21
2006-08-30	14	7.5	11	5 685.3	664.5	1.23
2014-08-05	11	6.2	10	5 600.8	757.5	1.02

5　中尺度特征

5.1　云图特征分析

由云图和200 hPa高度场叠加图(略)可以看到,上午,200 hPa青藏高压内部为晴空或色调为灰色的杂乱无章的低云,在高压北部,有块状、凌乱的云顶发展较高的对流云团发展。午后,高压内部有



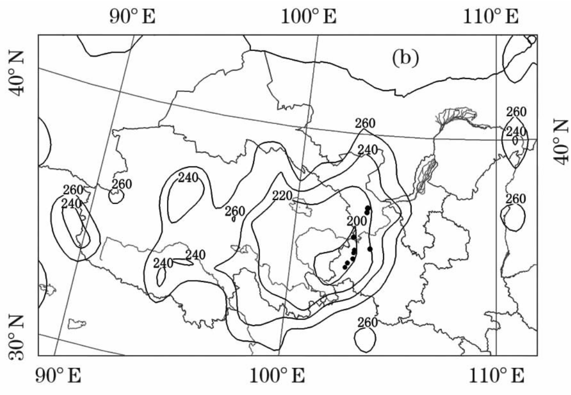


图4 2016年8月22日21:00 (a)、22:00 (b)、23:00 (c) FY-2云顶亮温(线条,单位:K)与短时强降水站点(黑点)分布

Fig.4 FY-2 cloud top brightness temperature (line,unit:K) and short time heavy precipitation station distribution (black spot) at 21:00 (a), 22:00 (b), 23:00 (c) on August 22, 2016

块状对流云团迅速发展,这些云团按高压内部风向即顺时针方向旋转,并合并。19 时以后,合并成大约 1×10^5 km^2 的类椭圆形云团,云顶最低亮温降至 −75 ℃,碌曲处在云团顺时针旋转前进方向的前方,亮温梯度最大处的中间位置。这种云型近似椭圆,亮温 < −52 ℃的结构持续了 4 h。

仔细分析逐时云顶亮温(*TBB*)图像(图 4)在强降水发生发展中的演变,并将逐时雨量与其叠加,以发现二者之间的关系。从图上可以看到,22 日 18 时以后,*TBB* 小于 220 K 的冷云区范围扩大,并在甘南西北部形成小块亮温小于 200 K 的冷云区,其东侧亮温梯度最大,*TBB* 在 200 ~ 220 K 之间的区域,在其东侧临夏等地出现局地短时强降水。19 时,冷云区范围迅速扩大,亮温小于 200 K 的冷云几乎覆盖了甘南西部,短时强降水仍出现在其东侧亮温梯度最大处,*TBB* 在 200 ~ 220 K 之间的区域,范围略向北扩。表明 *TBB* 最低处,对流发展最旺盛,降水越强。20 时,冷云区向东北方向发展,短时强降水区域也随之移动。21 时,小于 200 K 冷云范围有所缩小,过去的 1 h,只有碌曲出现 42 $mm\cdot h^{-1}$ 的强降水,而碌曲位于云顶前部 *TBB* 梯度最大处,且 *TBB* < 200 K 的区域。22 时,*TBB* < 200 K 的区域迅速向东收缩,仅覆盖甘南西部,而过去的 1 h,这一区域出现多处短时强降水。23 时以后,*TBB* < 220 K 的范围扩大,但 *TBB* < 200 K 的范围减小,消失,降水强度也随之减小。

综上所述,此次造成强降水的中尺度对流系统虽然面积、云顶亮温、偏心率都达到了 MCC(中尺度对流复合体),但持续时间不够长,还不能称为 MCC,但这种红外云图上类似 MCC 的对流系统应在预报业务中引起高度重视,应和各层等压面图及 *TBB* 资料对应,重点关注冷云是否与青藏高压对应,冷云中心区运动前方亮温梯度最大处是否出现强降水。

5.2 闪电资料特点

有研究[17]表明形成闪电的积雨云特性就是旺盛的对流和活跃的冰相发展,伴随着闪电发生。闪电和降水之间存在较好的正相关。22 日 16 ~ 17 时,对流云合并之初,云系北部对应青海东北部祁连山区为“负”地闪区域、南部即青海黄南州到甘南州北部为“正”地闪区域,地闪总次数为 486 次。到 17 ~ 18 时,“正”“负”地闪分布大致维持不变,对流云系南部的“正”地闪区南端,即碌曲、临潭县出现少量“负”地闪,地闪次数迅猛增加到 826 次。18 ~ 19 时,甘青地闪总次数增加到 991 次,但甘南境内地闪数量迅速减少,在前一个时次“正”地闪密集的夏河县和康乐县,这个时次只有零星“正”地闪,并

且均出现了两个站短时强降水。19～20时，甘青地闪总次数增加到1 113次，对流云系顺时针运动，其北部的“负”闪区随云系向东移动，南部的“正”闪区向西移动，甘南境内“正”闪减少，“负”闪开始增多。20～21时，观测区域内闪电数量迅猛减少到536次，尤以青海南部“正”地闪减少显著，此时“负”地闪从云系东北部向云系东部移动，整个甘南上空为“负”地闪，碌曲县出现42.1 mm的强降水。21～22时，甘青区域闪电总数再次降低，仅有360次，“负”地闪延着对流云东侧排列得很有组织，此时“正”闪数量已非常少，碌曲小时雨强达到71.6 $mm \cdot h^{-1}$，临夏、甘南的其它地方，有7站出现短时强降水。22～23时，总地闪数再次增多到635次，在“负”闪带规律东移的过程中，“正”地闪穿插在其中数量开始增多，而各地降水强度开始减小。

由以上分析可以看出：闪电资料对强对流天气有监测预警能力，并且有一定的预警提前量，闪电总数峰值后1～2 h，地面出现最强雨强，“正”闪减少，“负”闪增多并变的有组织时，对应地面最强降水时段。

5.3 地面加密观测资料演变与地形作用

从10 min加密自动站资料可以看到，19时之前甘南高原各站维持偏东风，19:30，碌曲站偏东风加大到8 $m \cdot s^{-1}$，其北部的夏河、合作东风减小，随后在19:40夏河转为西北风，夏河此时正出现短时强降水。20:00之后，碌曲也转为西北风，并在20:30风力达到12 $m \cdot s^{-1}$，碌曲开始出现降水并迅速加强，而此时其东部各站仍然维持偏东风，表明地面中尺度辐合线此时正在经过碌曲。21:00，碌曲转为西南风10 $m \cdot s^{-1}$，强降水进入最强时段，此时其北方合作为偏北风6 $m \cdot s^{-1}$，东部各站仍然维持4 $m \cdot s^{-1}$以上的偏东风，说明暖湿空气势力较强，中尺度高压东移过程中受阻力较大，导致地面中尺度辐合线在碌曲停留并有东西摆动。从地形来看，碌曲地处小盆地，西部和北部为高山，洮河自西向东流经碌曲，当碌曲以南地面受热低压控制，热低压北部偏东风沿洮河河谷西进，当中尺度辐合线经过，碌曲处于其前部时风向转为西南风，西南风受县城东北部西北－东南走向山脉阻挡，形成上升气流与中尺度辐合线上升气流叠加，加剧了上升运动。21:30分，甘南各站风力迅速减弱，降水随之减小。从碌曲6要素10 min自动站资料可以看到，自18时开始，碌曲站气压开始升高，气温下降，相对湿度增大，风向有>90°的转变，风速加大。气压最大值和气温、湿度最小值对应着最强降水时刻。

5.4 雷达回波特征

5.4.1 雷达回波演变特征 合作多普勒雷达于2014年建成投入业务使用，雷达站海拔3 372 m，在碌曲东北方向52 km处。利用合作雷达资料对22日碌曲极端降水过程进行分析。

（1）地面辐合线雷达回波演变特征 组合反射率图上，22日16时之后，合作西北部青海到夏河，有星星点点的点状对流回波出现，在之后的1 h，这些点状对流中的一小部分发展成为团状对流。17时之后，夏河附近的团状对流结合成北东北—南西南的对流带，宽度约20 km，长度约150 km。（17时，合作上空有>65 dBZ的强回波）18时之后，合作到碌曲一线，回波块结合成并不紧密的强回波带，在其西北方向，夏河的对流带经过1 h的重组，形成一条与合作平行的对流带。19时前一条对流带北端逐渐减弱，消失，南端，即碌曲以北40 km处，强度和位置均维持少动。而后面一条对流带北端东移，与前一条对流带遗留的南端合并并加强，而其南端经历了一次原地减弱，并在30～40 km以东重新建立的过程。20:00，高度有组织的多单体风暴形成对流带，距其前方碌曲约20～25 km，此时碌曲有点状对流回波生成。在接下来的1 h该点状对流迅速发展成块状回波，其后部的对流带也迅速东移，接近碌曲，并于21:00与碌曲对流块合并，此后1 h碌曲出现71.6 mm的强降水。21:40之后对流带东移出碌曲，碌曲逐渐变成层状云回波。速度图上（图5），19时与对流带相应的位置是0速度线，其西侧为入流，对应地面切变线后的西北气流，其东北侧为出流，对应地面切变线前的偏东风。入流和出流的强度最强均达到12 $m \cdot s^{-1}$。

（2）与碌曲极端降水对应对流单体的回波特征 从各阶段雷达回波剖面图上可以看到，带状对流系统中，镶嵌着许多对流单体，20:10，碌曲始现块状回波，并在下一个体扫强度迅速加强到35 dBZ以上。对应碌曲极端强降水最强时各层强度和速度：可以看到，20:30之前的降水由一个对流单体造成，20:30前后，有一个东边单体和原单体的合并加强，之后的极端降水主要由后一个对流单体在原地维持少动状态约1 h造成。从图5a可以看到，21:00前后在0.5°仰角上，这个对流单体尺度约为宽5 km，长10 km，西西北—东东南走向的块状，随着高度升

图5　8月22日21:09 0.5°(a)、3.4°(b)仰角反射率因子,3.4°(c)、14.6°(d)仰角速度(白圈为碌曲)

Fig.5　0.5 °(a) and 3.4°(b) elevation reflectivity factor,3.4°(c) and 14.6°(d) elevation velocity(white circle:Luqu) at 21:09 August 22

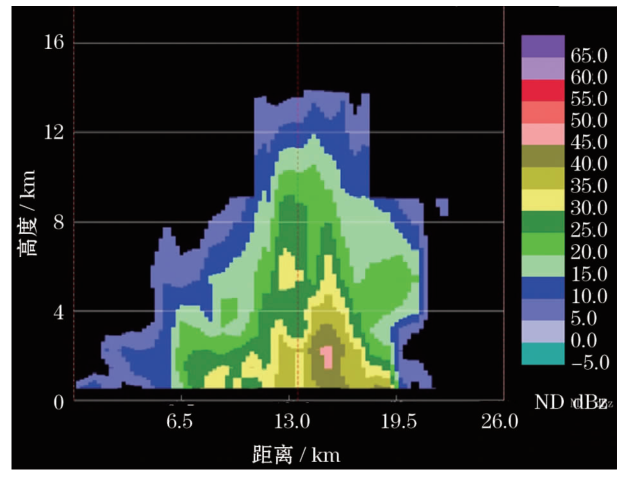


图6　2016年8月22日20:53反射率因子剖面

Fig.6　Reflectivity profile at 20:53 on August 22, 2016

高(图5b),3.4°仰角上回波向东北方向倾斜。在3.4°仰角上(图5c)可见风场的辐合,从20:48～21:14,14.6°仰角上(图5d)可见风暴顶的辐散。21:25,碌曲回波强度明显减弱。

在降水最强阶段沿东西方向对碌曲对流单体剖面图(图6)上,>35 dBZ的强回波均在5 km以下,即0 ℃层以下,以低质心的暖云降水为主,这也表明碌曲的降水效率较高。对流单体基本位于0 ℃层以下,表明降水是云中粒子是以水滴为主的暖云降水,这些都有助于提高降水效率,在预报预警中特别要警惕该类低层高湿的区域。

5.4.2　*CR*、*VIL*对雨强趋势的指示　由10 min雨量和组合反射率(*CR*)、垂直液态水含量(*VIL*)叠加图(图7)可以看到,20:10～20:20,*CR*和*VIL*出现并增大,地面出现10 mm以上降水,然后这两个值均有减弱,10 min后地面雨强也减小;20:40,*CR*和*VIL*大幅增大,*CR*在20:40达到45 dBZ,并维持3个体扫,于21:10开始减小。付双喜等[18]对甘肃中部8次降水个例的*VIL*进行统计,认为各种强度的降水*VIL*一般不超过3 kg · m^{-2},*VIL*值越大预示降

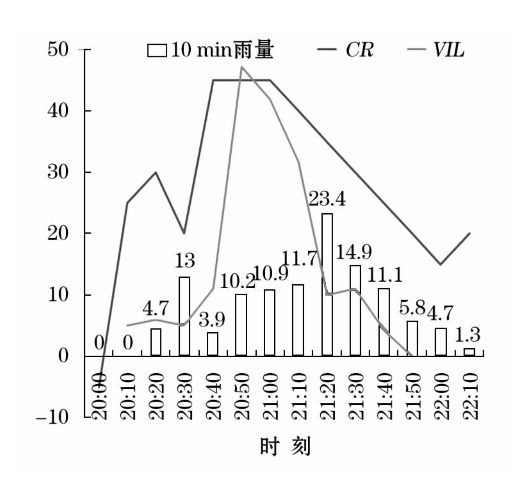


图7 2016年8月22日碌曲10 min雨量与雷达 *CR* 和 *VIL*

Fig. 7 10 min rainfall and radar *CR* and *VIL* Luqu of on August 22, 2016

水强度越大。合作雷达 *VIL* 于20:50出现最大值4.72 kg·m^{-2},21:00即刻减小。从图可以看到,*CR* 和 *VIL* 对雨强具有比较显著的预示作用,当 *CR* 出现最大值40 min后,*VIL* 出现最大值30 min后,地面出现10 min 23.4 mm的最大雨强。

6 结 论

此次极端降水过程发生在高能、高湿的副高内部,由地面东移辐合线触发形成,对流特征比较明显。短时雨强大,且降水极端集中。由于500 hPa高压高度高,环流完整,而且降水系统发展速度极快,全球模式和预报员均对此次降水的预报准确性较差。通过对这次副高内部的极端强降水过程的各种尺度的影响系统演变分析,尝试寻找其发生的有利条件,为以后此类天气提供技术参考。

(1) 此次碌曲极端强降水发生在500 hPa高压内部592 dagpm线附近,但高层200 hPa青藏高压东北部辐散区的抽吸作用和近地面层的中尺度辐合线的上升运动叠置,形成了强烈的上升运动,产生强烈降水。

(2) 环境场极大的水汽,异常厚的暖云层,和很小的垂直风切变在碌曲形成了极大的降水效率。

(3) 在降水过程中,对流云团沿青藏高压外围旋转、合并、发展,冷云盖中心区域运动前方 *TBB* 梯度最大处对应地面降水最强处。

(4) 闪电总次数峰值后1~2 h,"正"闪数下降,"负"闪数增多,且闪电带变的很有组织时,对应地面最强降水时段。

(5) 造成强降水的对流单体的雷达回波表现出低质心暖云降水的特征,在 *CR*、*VIL* 最大值出现后30~40 min,最强雨强出现。

通过对此次高原东部极端强降水综合分析,可以发现,这次极端强降水具有一定的短时临近可预报性:地面加密资料、卫星云图 *TBB*、闪电、雷达回波 *CR*、*VIL* 等资料均对地面强降水有一定的提前预示作用,在业务中要分析应用好这些中尺度观测资料。另外在这次极端强降水过程中,雷达回波强度并不很强,持续时间也不很长,却产生如此高的降水效率,是值得深入研究的。

参考文献(References)

[1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980:35. [TAO Shiyan. Torrential rain in China [M]. Beijing: Science Press, 1980:35.]

[2] 陶健红,王宝鉴. 甘肃省短期天气预报员手册[M]. 北京:气象出版社,2012:86. [TAO Jianhong, WANG Baojian. Handbook for short-term weather forecasters in Gansu [M]. Meteorology Press, 2012:86.]

[3] 白肇烨,徐国昌. 中国西北天气[M]. 北京:气象出版社,1988:215-216. [BAI Zhaoye, XU Guochang. The weather in the Northwest of China[M]. Beijing:Meteorology Press,1988:215-216.]

[4] 吴国雄,丑纪范,刘屹岷,等. 副热带高压研究进展及展望[J]. 大气科学,2003,27(4):503-517. [WU Guoxiong, CHOU Jifan, Liu Yimin, et al. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003,27(4):503-517.]

[5] 傅云飞,冼桃. 副热带高压中心区域内云和降水气候特征研究回顾与展望[J]. 暴雨灾害,2017,36(6):489-497. [FU Yunfei, XIAN Tao. Review and prospect of climate characteristics of cloud and precipitation in subtropical high center[J]. Torrential Rain and Disasters,2017,36(6):489-497]

[6] 曹美兰,俞燎霓. 一次发生在副高内的强对流天气的诊断分析[J]. 科技通报,2012,28(1):58-61. [CAO Meilan, YU Liaoni. The diagnosis of severe convective weather occurred in the subtropical high[J]. Bulletin of Science and Technoidgy, 2012, 28(1):58-61.]

[7] 尹红萍,曹晓岗. 盛夏上海地区副热带高压型强对流特点分析[J]. 气象,2010,36(8):19-25. [YIN Hongping, CAO Xiaogang. Summary on subtropical high severe convection during midsummer in Shanghai area[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(8):19-25.]

[8] 支树林,陈娟,包慧漾. 一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象,2015,41(10):1203-1214. [ZHI Shulin, CHEN Juan, BAO Huiyang. Mesoscale characteristics analysis of rainstorm on the edge of subtropical high[J]. Meteorological Monthly,2015,41(10):1204-1215.]

[9] 赵庆云,狄潇泓,张铁军. "8·19"甘肃区域暴雨的特征分析及数值模拟[J]. 干旱气象,2005,23(4):12-16. [ZHAO Qingyun, DI Xiaohong, ZHANG Tiejun. Analysis and numerical

simulation of the heavy rain in Gansu Province on 19 August 2004 [J]. Arid Meteorology,2005,23(4):12-16.]

[10] 李如琦,李建刚,王江,等.南疆西部暴雨过程的动力热力结构分析[J].干旱区地理,2018,41(1):9-16.[LI Ruqi,LI Jiangang,WANG Jiang,et al. Dynamic and thermal structure characteristics of the rainstorms in the west of South Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2018,41(1):9-16.]

[11] 许东蓓,刘抗,孟丽霞,等."8.12"甘肃大暴雨特征分析[J].干旱区地理,2013,36(2):245-252[XU Dongbei, LIU Kang, MENG Lixia,et al. Charactertics of heavy rainfall occurred on 12 August 2010 in Gansu,China[J]. Arid Land Geography,2013,36(2):245-252]

[12] 程瑛,黄武斌,沙宏娥.甘肃岷县两次强降水致山洪泥石流灾害特征对比分析[J].干旱区地理,2018,41(3):443-448.[CHENG Ying,HUANG Wubin,SHA Honger. Cause of two heavy rainfall causing massive mudslide in Minxian County,Gansu Province[J]. Arid Land Geography,2018,41(3):443-448]

[13] 付双喜,何金梅.甘肃短时强降水天气若干环境参数特征分析[J].干旱区地理,2015,38(3):469-477.[FU Shuangxi,HE Jinmei. Short-time heavy precipitation characteristics of several environmental parameters of Gansu Province[J]. Arid Land Geography,2015,38(3):469-477.]

[14] DOSWELL III C A, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecas-ring:An ingredients based methodology[J]. Wea Forecasting,1996,11:560-581.

[15] 孙军,谌芸,杨舒楠,等.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,2012,38(10):1267-1277.[SUN Jun,CHEN Yun,YANG Shunan,et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part Ⅱ:Preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteorological Monthly,2012,38(10):1267-1277.]

[16] 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J].气象,2012,38(10):1278-1287.[FANG Chong,MAO Dongyan,ZHANG Xiaowen,et al. Analysis on the mesoscale convective comditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteorological Monthly,2012,38(10):1278-1287.]

[17] 章国材,矫梅燕,李延香,等.现代天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社,2007:103.[ZHANG Guocai,JIAO Meiyan,LI Yanxiang,et al. Modern weather forecast techniques and methods [M]. Beijing:Meteorology Press,2017:103.]

[18] 付双喜,安林,康凤琴,等.VIL在识别冰雹云中的应用及估测误差分析[J].高原气象,2004,23(6):811-815.[FU Shuangxi,AN Lin,KANG Fengqin,et al. Application of VIL in identification of hailstorms and estimation error analysis[J]. Plateau Meteorology,2004,23(6):811-815.]

Predictability of an extreme heavy rainfall inside the subtropical high pressure in Gansu

DI Xiao-hong[1], WANG Xiao-yong[2], XIAO Wei[1]

(1 *Lanzhou Centre Meteorological Observation*, *Lanzhou* 730020, *Gansu*, *China*;
2 *Gansu Provincial Meteorological Service Center*, *Lanzhou* 730020, *Gansu*, *China*)

Abstract: Traditionally,the subtropical highs are considered to be dominated by downward motion,not conducive to precipitation in these areas. But there have been a heavy precipitation within the subtropical high every few years in Gansu Province,China. It is very difficult to forecast heavy rainfall inside the subtropical high. An extreme heavy precipitation process under the control of the subtropical high occurred in Gansu are analyzed by a variety of conventional and unconventional observations to study its forming mechanism. From the prediction results of models,it is found that the large scale model behaved poorly in predicting this kind of heavy rainfall. Through the observation data,the overlay of the area of divergence in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau with high pressure and the mesoscale convergence line near surface layer contributed to form a strong upward movement,which constituted the weather condition of the heavy precipitation. Against this background,abundant water vapor,extremely thick warm clouds,and weak vertical wind shear created a high probability of strong precipitation. By analyzing various mesoscale observation data,some factors that have indicative effect in predicting such heavy rainfall have been found as follows: (1) The maximum gradient of *TBB* (Temperature of Black-Body) in front of the movement direction of the cold desk center in the convective cloud cluster was the place with the strongest precipitation. (2) The strongest precipitation occurred about 1-2 hours after the total number of lightning reached its peak and with the lightning places were well positioned. (3) Radar echoes of the convective bodies which caused heavy rainfall have echo characteristics of warm cloud precipitation with low mass center. (4) The strongest rain intensity appeared about 30-40 minutes after the maximums of *CR* and *VIL* were reached.

Key words: extreme heavy rainfall; subtropical high; predictability; precipitation efficiency